

Enfin, à partir des 3400 os de moutons provenant des sites d'Asie occidentale, nous avons calculé un indice caractérisant la taille des animaux. Il s'avère que les moutons sont restés relativement petits jusqu'à 4500 avant notre ère à peu près, puis que leurs tailles ont augmenté jusqu'à 4000 environ. Même si cette observation n'est fondée que sur quelques individus, une certaine dispersion des valeurs est perceptible dans le millénaire qui suit, ce qui suggère une stabilisation de la taille. Au vu de toutes les autres informations disponibles, l'explication la plus plausible de cette stabilisation de la taille est que, au début du V^e millénaire, les éleveurs d'Asie occidentale s'étaient orientés vers un type de mouton optimal pour la production de laine, et que de plus en plus d'éleveurs l'ont ensuite adopté vers la fin de ce millénaire.

Une évolution similaire est perceptible dans le sud-est de l'Europe, mais seulement après le milieu du IV^e millénaire. Bien que l'indice de taille augmente plus modérément, le très grand échantillon étudié, constitué de plus de 6300 os, le rend statistiquement significatif et suggère qu'une nouvelle race de mouton a été introduite dans cette région à partir de 3500 avant notre ère. S'agit-il des moutons sélectionnés en Asie occidentale? Nous ne sommes pas en mesure de le dire, mais une sélection locale semble peu probable.

L'exploitation de la laine pour produire des tissus, des tresses et du feutre est sans aucun doute l'une des innovations techniques les plus importantes de la Préhistoire. Pour la première fois, on disposait de tissus fins et colorés pouvant être traités de différentes manières. Ce que nous avons mis en évidence

ne suffit cependant pas pour parler de révolution textile: il est manifeste qu'un processus lent et graduel a préparé l'avènement de la laine par étapes.

Tout a commencé à la faveur de mutations aléatoires de gènes de moutons en un ou plusieurs endroits, dont les effets ont été remar-

L'exploitation de la laine est l'une des plus grandes innovations de la Préhistoire

Un fuseau, c'est-à-dire un petit axe en bois à l'inertie renforcée par un petit volant d'argile, suffit pour filer de la laine ou des fibres végétales. Au Néolithique, on utilisait beaucoup les fuseaux pour produire du fil, puis du tissu.

qués et sélectionnés par les éleveurs. Cela s'est produit bien plus tôt qu'on ne le pensait: dès le V^e millénaire en Asie occidentale et à partir du milieu du IV^e millénaire en Europe. Au cours du millénaire suivant, les fibres animales ont prédominé dans la production textile.

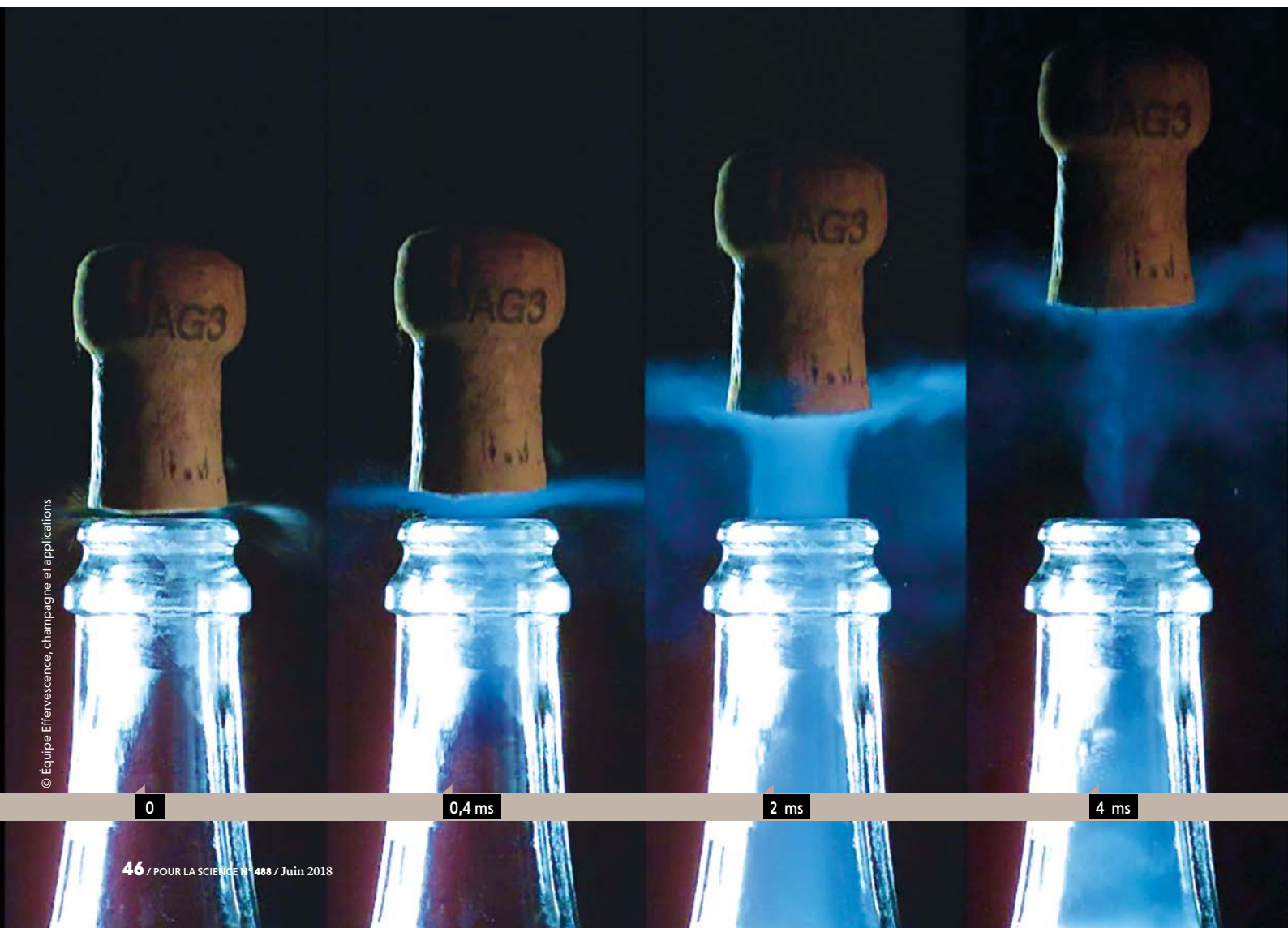
Nos données indiquent en outre que les éleveurs préhistoriques poursuivaient des objectifs variés: production de viande, de lait ou de laine. Parfois, même des groupes voisins se livraient à des activités différentes. Nous ne pouvons que spéculer sur les raisons. Les connaissances détenues dans certains villages étaient-elles plus grandes que dans d'autres? Y avait-il chez certains groupes une forte inféodation aux traditions ancestrales qui les aurait amenés à rejeter les innovations que d'autres adoptaient?

Évaluer l'importance relative de l'élevage par rapport à l'agriculture est en outre difficile. Bien que des restes de plantes carbonisées aient été préservés dans la plupart des habitats, les sélections subies par les espèces végétales sont très différentes de celles qu'ont connues les animaux. On peut donc comprendre l'importance relative des différentes espèces animales, mais pas celle de l'élevage dans son ensemble par rapport à l'agriculture.

Seuls les écrits et les bas-reliefs des cités mésopotamiennes, puis des civilisations ultérieures, nous prouvent complètement l'existence d'une industrie de la laine. Quant à la légende de la Toison d'or, elle a probablement une signification historique, puisqu'en Colchide, on extrayait de l'or des rivières à l'aide de peaux de mouton... ■



Le fugace nuage bleu du champagne



L'ESSENTIEL

> Quand on débouche une bouteille de champagne stockée à 20 °C, on observe un nuage bleuté dans le col de la bouteille et dans le sillage du bouchon.

> Ce phénomène, qui ne se produit pas avec une bouteille froide, ne dure que quelques millisecondes : après, le nuage de condensation blanchit.

> Les auteurs ont proposé un modèle théorique qui explique l'apparition du panache bleuté et sa disparition.

> L'aspect bleuté résulte de la diffusion de la lumière ambiante par de minuscules cristaux de dioxyde de carbone, bien plus petits que les longueurs d'onde de la lumière visible.

LES AUTEURS



GÉRARD LIGER-BELAIR
professeur de physique à l'université de Reims, fondateur de l'équipe Effervescence au laboratoire GSMA (UMR CNRS 7331)



DANIEL CORDIER
astrophysicien, chargé de recherche du CNRS au sein du GSMA (Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique)



JACQUES HONVAULT
ingénieur des Arts et Métiers, photographe et spécialiste de l'imagerie numérique à haute vitesse

Débouchez une bouteille de champagne stockée à 20 °C et filmez la scène au ralenti : vous pourrez constater l'apparition, pendant quelques millisecondes, d'un panache bleuté dans le sillage du bouchon. Ce phénomène, remarqué il y a quelques années, a désormais son explication. La voici.

Cette séquence de clichés montre la première seconde du débouchage d'une bouteille de champagne gerbeuse, à 20 °C.



En moyenne, ce sont près de dix bouchons de champagne qui sautent chaque seconde dans le monde. Et ce chiffre explose bien entendu aux moments festifs de l'année.

Les tout premiers millièmes de seconde qui suivent le débouchage retiennent aujourd'hui toute notre attention : c'est l'instant précis où l'énergie enfermée dans la bouteille se libère, en permettant au gaz carbonique dissous dans le liquide de s'échapper sous forme de bulles.

Il y a quelques années, en filmant le débouchage d'un lot de bouteilles de champagne stockées à température ambiante, nous avions constaté un phénomène aussi curieux qu'inattendu : dans le sillage du bouchon qui saute, apparaît un nuage bleu azur. À l'époque, nous n'avions pas pu expliquer de façon satisfaisante son origine. Ce n'est que récemment que nous avons proposé et publié, après examen par des pairs, un modèle théorique du phénomène, et c'est cette explication que nous présentons ici.

LE DÉBOUCHAGE DU CHAMPAGNE AU RALENTI

L'étude des quelques millièmes de seconde qui suivent le débouchage d'une bouteille de champagne s'inscrit dans un programme de recherche ambitieux dont l'objectif est de mieux comprendre un phénomène redouté des élaborateurs de vins effervescents : le gerbage, terme qui désigne la production excessive de bulles et de mousse à l'ouverture de la bouteille.

Quand on débouche une telle bouteille, on observe qu'elle gerbe moins de une demi-seconde après son débouchage (*voir la séquence de photographies pages précédentes*). Mais remontons le temps et observons ce qui se passe en amont de cet instant. Environ 0,4 milliseconde après le débouchage, on voit apparaître un nuage de condensation bleuté dans le col de la bouteille et dans le sillage du bouchon qui saute. Quelques millisecondes plus tard, ce nuage bleuté disparaît du sillage du bouchon, mais demeure encore très persistant dans le goulot de la bouteille, où sa couleur vire progressivement au blanc-gris.

Afin de comprendre l'origine du nuage bleu, nous avons examiné les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de bouteilles stockées à différentes températures (*voir les photographies page suivante*). Pour ce faire, nous disposons de 30 bouteilles de champagne rosé, que nous avons réparties en trois lots de 10 bouteilles. Quarante-huit heures avant de réaliser nos observations, les trois lots ont été stockés à des températures respectives de 6, 12 et 20°C.

Les phénomènes de condensation surviennent lors du débouchage d'une bouteille de champagne (ou de toute autre boisson gazeuse)

froide ont été décrits et compris par les scientifiques il y a déjà longtemps. L'explication couramment proposée est la suivante.

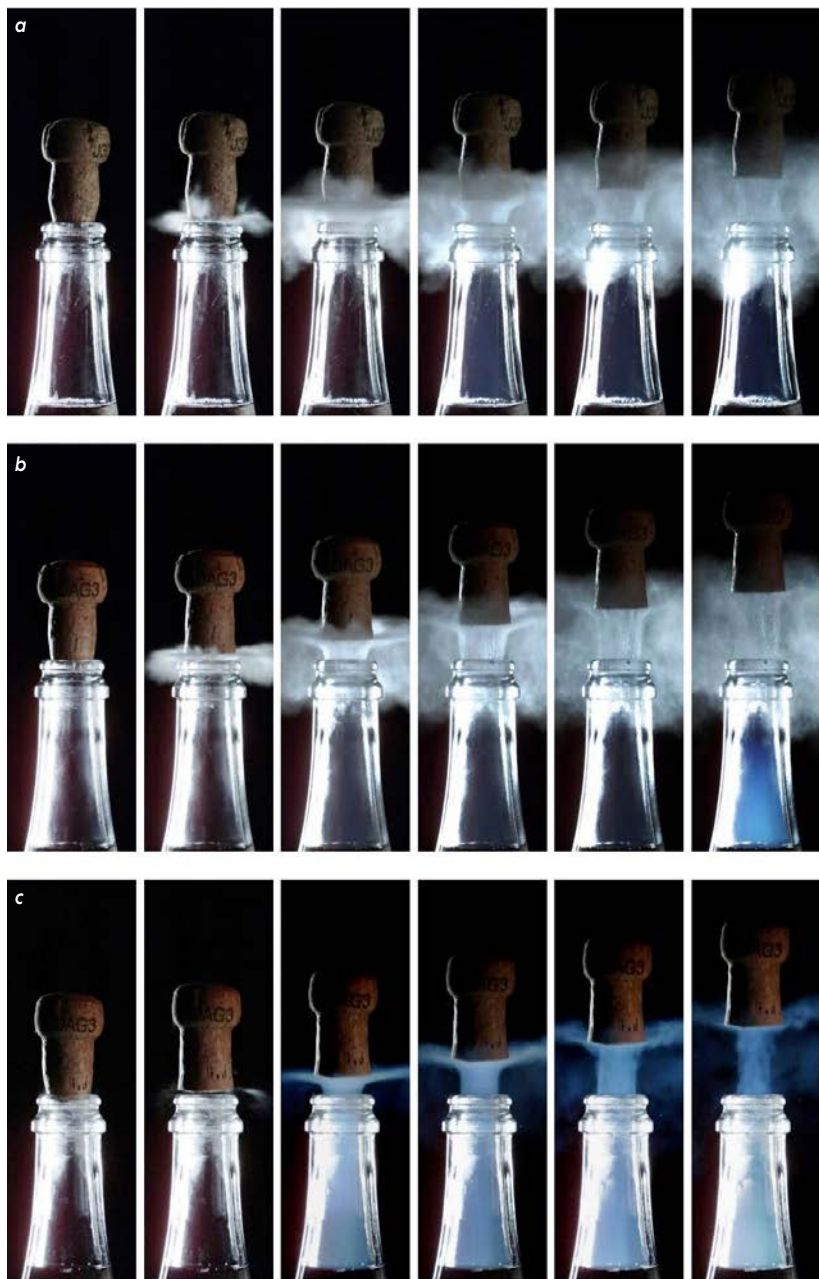
Au moment du débouchage, la décompression brutale du gaz sous pression présent dans le col de la bouteille s'accompagne d'une chute de sa température (les physiciens parlent d'une détente adiabatique). Ce nuage de gaz froid refroidit l'air ambiant. Or ce dernier contient de la vapeur d'eau. En se refroidissant, la vapeur d'eau se condense sous la forme d'un brouillard de minuscules gouttelettes dont la taille varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. La diffusion de la lumière ambiante par ces gouttelettes se fait de façon quasi isotrope dans l'espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible. Cela confère au panache de condensation une teinte blanchâtre.

Ce mode de diffusion de la lumière, où la taille des objets qui diffusent le rayonnement est comparable ou supérieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante (de 0,4 micromètre pour le bleu à 0,8 micromètre pour le rouge), est connu sous le nom de diffusion de Mie, du nom du physicien allemand Gustav Mie, mort en 1957.

Dans le goulot de la bouteille, le nuage bleu persiste mais devient blanc-gris

La description que nous venons de donner est bien conforme à ce que l'on observe quand on débouche des bouteilles stockées à 6°C ou à 12°C. D'ailleurs, à une tout autre échelle, celle de l'atmosphère, les nuages voient le jour selon le même principe : des masses d'air chargées de vapeur d'eau montent en altitude et se refroidissent progressivement, ce qui entraîne la condensation de leur eau en masses nuageuses – lesquelles sont visibles grâce à la diffusion de la lumière solaire par leurs gouttelettes d'eau, diffusion qui fait apparaître blancs ou gris les nuages.

Cependant, dans le cas d'une bouteille de champagne stockée à la température ambiante



de 20°C, pourquoi le nuage de condensation apparaît-il directement dans le goulot de la bouteille et pourquoi est-il bleu azur et non pas blanc? La clé de l'énigme se trouve dans la relation qui existe entre la température des gaz qui s'échappent du col de la bouteille et la température initiale de celle-ci.

LA PRESSION DANS UNE BOUTEILLE DÉPEND DE SA TEMPÉRATURE

À la suite d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (la «prise de mousse»), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la méthode traditionnelle se chargent en gaz carbonique

Ces clichés permettent de comparer les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de trois bouteilles stockées respectivement à 6°C (a), 12°C (b) et 20°C (c). L'intervalle de temps entre deux images successives est de 0,4 milliseconde. On constate que le nuage bleu n'apparaît que pour une température initiale assez élevée: sinon, le refroidissement dû à la détente du gaz n'est pas suffisant pour que se forment les minuscules cristaux de dioxyde de carbone qui diffusent le bleu plus efficacement que les autres longueurs d'onde de la lumière.

dissous. Or la solubilité du dioxyde de carbone (CO_2) est très sensible à la température: plus le vin est froid, plus le gaz carbonique y est soluble. Cela implique que, pour une quantité fixe de CO_2 dans une bouteille close, la pression due au CO_2 (sa «pression partielle») régnant dans le col de la bouteille sera d'autant plus faible que la température est basse, puisque la quantité de CO_2 dissous dans le liquide sera plus grande.

On peut calculer avec une grande précision la pression de gaz carbonique qui règne dans une bouteille en fonction de sa température. Pour ce faire, on fait appel à la loi des gaz parfaits, à celle de la conservation de la matière et à la loi de Henry, énoncée en 1803 et selon laquelle la concentration en gaz dissous est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz dans le col de la bouteille, le facteur de proportionnalité étant la solubilité. On trouve ainsi que dans une bouteille de 75 centilitres, la pression de gaz carbonique est de 4,5 bars à la température de 6°C, et qu'elle passe à 7,5 bars pour une bouteille à 20°C.

La température initiale d'une bouteille de champagne doit donc de toute évidence jouer un rôle sur les phénomènes de condensation qui accompagnent son débouchage.

GROS PLAN SUR LA DÉTENTE ADIABATIQUE

De fait, la chute de la température des gaz s'échappant du col dépend directement de la chute de pression qu'ils subissent lorsque le bouchon saute.

En effet, lorsque le bouchon saute, le volume de gaz présent sous pression dans le col de la bouteille se détend brutalement. Il s'agit d'une détente adiabatique, ce qui signifie que le processus se déroule sans échange de chaleur avec l'extérieur. La température du gaz chute alors de façon concomitante pour atteindre une nouvelle température T' donnée par une relation bien connue et qui s'écrit:

$$T'/T = (P_0/P_B)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Dans cette formule, T est la température initiale régnant dans la bouteille encore bouchée, P_0 est la pression ambiante (de l'ordre de 10^5 pascals, soit 1 bar), P_B est la pression du gaz régnant dans la bouteille bouchée (et qui dépend beaucoup de la température initiale T de la bouteille), et γ (gamma) désigne l'indice adiabatique du gaz, défini comme le rapport de ses capacités calorifiques à pression et à volume constants, et qui est égal à environ 1,3 pour le CO_2 .

On peut tracer la température T' atteinte par le gaz en fonction de la température initiale T de la bouteille (voir le graphique page 51). On voit que, de façon assez contre-intuitive, cette température du gaz détendu est d'autant plus basse que la température ➤

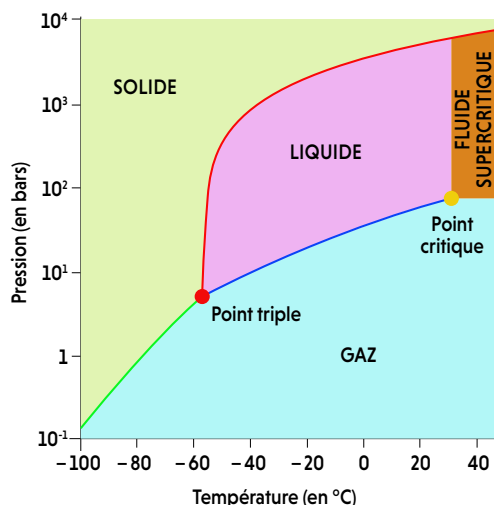
> initiale de la bouteille est élevée. En théorie, la température du gaz qui se détend hors d'une bouteille stockée à 20 °C chute à presque -90 °C ! Dans un environnement aussi glacial, que deviennent les différentes espèces gazeuses présentes ?

DES CRISTAUX DE NEIGE CARBONIQUE

En fonction de sa température et de sa pression, un corps pur est susceptible d'exister sous trois phases – gazeuse, liquide ou solide. Prenons par exemple le cas familier de l'eau. Sous une pression de 1 bar et à 20 °C, l'eau est liquide. Elle peut se transformer en glace au-dessous de 0 °C et, à 100 °C, elle commence à bouillir pour se transformer intégralement en vapeur.

Qu'en est-il du CO₂ ? Le diagramme de phase de ce corps pur montre qu'aux températures et aux pressions de quelques bars régnant dans une bouteille bouchée, le CO₂ est un gaz (voir le diagramme ci-dessus). Lorsque le bouchon saute, il se détend brutalement et sa pression rejoint celle de l'atmosphère extérieure, c'est-à-dire 1 bar. Et dans ce processus adiabatique, sa température chute de plusieurs dizaines de degrés (voir le graphique page suivante). Or le diagramme de phase montre qu'à une pression de 1 bar, le CO₂ est gazeux au-dessus de -78,5 °C, mais qu'au-dessous de cette température, il est sous sa forme solide (la glace carbonique).

Si l'on se réfère au graphique montrant la température atteinte après le débouchage en fonction de la température initiale de la bouteille, on remarque qu'une bouteille initialement à 6 °C voit la température des gaz qui s'en échappent chuter à près de -77 °C. Autrement dit, il ne fait pas encore assez froid pour que les vapeurs de CO₂ se condensent en glace carbonique.



Le diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone. On voit en particulier qu'à la pression atmosphérique (soit 1 bar), des cristaux de CO₂ ne peuvent apparaître que si la température est inférieure à environ -80 °C.

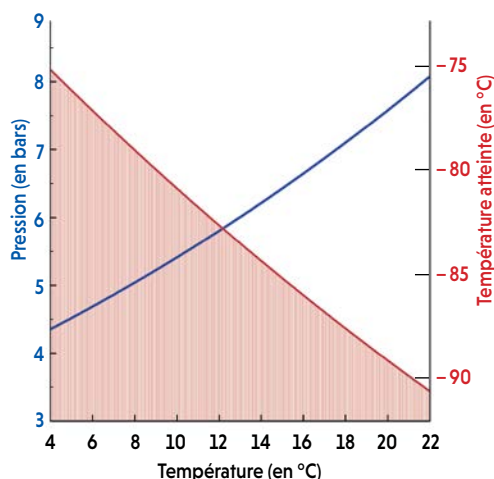
Pour les bouteilles stockées à 12 et à 20 °C, la température des gaz qui se détendent chute respectivement à -83 °C et -89 °C. Ces valeurs sont inférieures au seuil de -78,5 °C. En théorie, les vapeurs de CO₂ qui jaillissent hors du col de la bouteille sont donc susceptibles de se transformer en glace carbonique.

Cependant, même si la température du gaz carbonique chute sous le seuil de condensation, le changement de phase ne s'effectue pas aussi aisément. Les vapeurs de CO₂ ne peuvent pas se transformer en cristaux de neige carbonique *ex nihilo* : il ne fait pas encore assez froid pour cela. Pour se transformer en cristaux, le gaz carbonique a besoin de noyaux de condensation qui serviront de catalyseurs pour enclencher le processus. Et c'est à cette étape qu'un autre acteur du système entre en jeu : la vapeur d'eau – pas celle contenue dans l'air ambiant, mais celle présente dans le col de la bouteille.

En effet, le gaz présent dans le col de la bouteille encore bouchée contient de la vapeur d'eau en équilibre avec le champagne qui,

Les phénomènes de condensation à l'œuvre dans le nuage bleu du champagne sont similaires à ceux que présentent les gaz s'échappant des tuyères d'un réacteur de fusée. Les particules diffusantes y sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible, d'où une diffusion dite de Rayleigh de la lumière ambiante, qui fait apparaître du bleu (davantage diffusé que les autres longueurs d'onde). C'est ce même régime de diffusion qui fait apparaître bleu le ciel.





Ces deux graphiques montrent, en fonction de la température de la bouteille bouchée, la pression partielle de CO_2 régnant dans le col de la bouteille (en bleu) et la température atteinte par le nuage de gaz carbonique après que le bouchon a sauté (en rouge).

rappelons-le, est formé d'environ 85% d'eau en volume. La teneur en vapeur d'eau dans le col d'une bouteille augmente avec sa température, selon une loi connue (la loi de Clausius-Clapeyron). Elle passe de 0,9% dans le col d'une bouteille à 6°C, à environ 2,3% pour une bouteille à 20°C.

Comme on l'a vu, lorsque le bouchon saute, les gaz initialement sous pression dans le col d'une bouteille se détendent et leur température chute à plusieurs dizaines de degrés sous la température de congélation de l'eau. Il fait alors si froid que la vapeur d'eau se transforme instantanément en cristaux de glace d'eau *ex nihilo* (c'est-à-dire sans que la présence de noyaux de condensation soit nécessaire), à la différence du gaz carbonique. Ce sont donc les cristaux de glace d'eau nés dans le col de la bouteille qui servent de noyaux solides pour la condensation du gaz carbonique en neige carbonique.

Des phénomènes similaires ont été mis en évidence dans le mélange gazeux qui se détend dans les tuyères des moteurs de fusées (voir la photographie page précédente). Là aussi, les gaz les plus facilement condensables (en général l'eau et le CO_2) servent de noyaux solides qui rendent possible la condensation des espèces présentant des températures de condensation bien plus basses (tels que le dioxygène et le diazote).

Le panache bleu azur qui apparaît dans le sillage du bouchon qui saute et dans le col de la bouteille serait donc la signature de la transformation des vapeurs de CO_2 en cristaux de neige carbonique. Mais pourquoi ce panache est-il bleu, alors que le nuage de condensation de la vapeur d'eau ambiante qui caractérise le débouchage des bouteilles plus froides apparaît plutôt blanc ?

Cette couleur bleue a certainement pour origine la très petite taille des cristaux de neige carbonique qui diffusent la lumière ambiante. En effet, lorsque les cristaux qui diffusent la lumière sont de taille très inférieure aux

longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante (centrée autour de 0,6 micromètre environ), ils diffusent bien plus efficacement les petites longueurs d'onde du spectre, et donc la lumière bleue. Le nuage de condensation apparaît alors bleuté et non pas blanc comme dans le cas de la diffusion de Mie, où la taille des objets qui diffusent la lumière est comparable à celle de la longueur d'onde incidente.

COMME LE BLEU DU CIEL

Ce mode de diffusion de la lumière par des particules plus petites que les longueurs d'onde incidentes est connu sous le nom de diffusion de Rayleigh (d'après le physicien anglais John Rayleigh, ou Lord Rayleigh, 1842-1919). C'est d'ailleurs le même phénomène qui explique pourquoi le ciel nous apparaît bleu. Les molécules qui composent l'atmosphère de notre planète sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière solaire. Le bleu est donc bien plus efficacement diffusé que les autres couleurs du spectre, et c'est pourquoi l'atmosphère terrestre nous apparaît de cette couleur (voir la photographie page précédente).

Et si le nuage de condensation du gaz carbonique ne blanchit pas hors du goulot de la bouteille, c'est parce que les cristaux de neige carbonique dont il est constitué ne peuvent pas croître suffisamment pour atteindre des tailles micrométriques, qui le feraient paraître blanc par diffusion de la lumière ambiante. En effet, l'air ambiant, à une vingtaine de degrés Celsius, agit comme un immense réservoir thermique. Très vite, la température du nuage de condensation remonte alors au-dessus des $-78,5^\circ\text{C}$ fatidiques, et les cristaux de neige carbonique se subliment pour se transformer en gaz carbonique. Ainsi, au bout de quelques millisecondes, le nuage bleu s'évanouit au-dessus du goulot.

Cependant, confiné dans le goulot de la bouteille, le nuage de condensation est protégé du réservoir thermique un peu plus longtemps. Les cristaux de neige carbonique sont donc susceptibles de croître autour de leur cœur de glace d'eau. Ils atteignent alors des tailles micrométriques et le nuage de condensation présent dans le goulot change progressivement de couleur. Il vire du bleu profond au blanc-gris, comme on peut clairement le constater sur les photographies reproduites.

En d'autres termes, pour ce qui est de la diffusion de la lumière ambiante, on passe progressivement d'un régime de Rayleigh, dû à des cristaux de taille très inférieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante, à un régime de Mie lorsque la taille des cristaux de neige carbonique devient comparable ou supérieure à ces longueurs d'onde. Le nuage bleu visible lors du débouchage d'une bouteille de champagne à température ambiante et son changement de couleur n'ont ainsi plus de mystères... ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et al., **Unveiling CO_2 heterogeneous freezing plumes during champagne cork popping**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 10938, 2017.

G. Liger-Belair et al., **Un océan dans une flûte de champagne**, *Pour la Science*, n° 459, pp. 36-41, janvier 2016.

M. Vollmer et K.-P. Möllmann, **Vapour pressure and adiabatic cooling from champagne : Slow-motion visualization of gas thermodynamics**, *Physics Education*, vol. 45, pp. 608-615, 2012.

B. E. Wyslouzil et al., **Binary condensation in a supersonic nozzle**, *Journal of Chemical Physics*, vol. 113, pp. 7317-7329, 2000.

R. Batt, **Pop ! Goes the champagne bottle cork**, *Journal of Chemical Education*, vol. 48, p. 75, 1971.

RONAN ALLAIN

est le paléontologue chargé de la conservation des collections de reptiles et d'oiseaux fossiles au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Spécialiste des dinosaures, il participe aux fouilles du site d'Angeac-Charente, qui a livré de nombreux squelettes de dinosaures, notamment un fémur de sauropode de 2,3 mètres de long.



Trix, le premier T. rex jamais exposé en France



Pendant tout l'été, le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, présente Trix, une femelle tyrannosaure découverte dans le Montana. Ronan Allain, commissaire scientifique de l'exposition, nous raconte la vie de cet hypercarnassier du Crétacé.